

고조파 저감형 3상 5레벨 PWM 인버터에 관한 연구

(A Study on the Harmonic Reduction Type 3 Phase 5 Level PWM Inverter)

송언빈*

(Eon-Bin Song)

요 약

인버터의 출력파형에 포함되는 고조파를 저감하기 위하여 소프트웨어에 의하여 W형태와 M형태의 펄스 폭 변조 신호로 구동되는 3상 5 레벨 PWM 인버터를 구현하였고, 인버터의 출력전압의 종합 고조파 왜율을 비교 분석하였다. 제안한 M형 펄스 폭 변조 제어에 의하면 PWM 인버터의 종합 고조파 왜율을 크게 낮출 수 있어 인버터 응용 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. W형 및 M형의 펄스 폭 변조제어 3상 5레벨 PWM 인버터를 구현하여 인버터 출력전압의 종합 고조파 왜율을 5(%)이하로 유지됨을 입증하였다.

Abstract

3 phase 5 level PWM inverter driven by software based W-type and M-type pulse width modulation is presented to reduce harmonics in the inverter and total harmonic distortion of the inverter is reviewed and analyzed. The proposed M-type modulation technique can be reduced significantly total harmonic distortion of PWM inverter and be improved the performance of the inverter application system. By the software based W-type and M-type pulse width modulation the presented 3 phase 5 level PWM inverter is verified that total harmonic distortion is less than 5(%).

1. 서 론

최근에 인버터를 응용한 전동기 가변속 구동장치 또는 무정전 전원장치에서 인버터에서 발생하는 고조파를 최대한 줄이는 것이 중요한 과제가 되고 있다. 이 고조파는 전기설비에서 진상 콘덴서의 소손,

각종 계전기의 오동작, 사무 자동화 시스템 및 컴퓨터 시스템의 오동작, 각종 제어 시스템의 동작 불량, 전동기 소음 및 토오크 맥동 등 여러 가지 문제를 일으키고 있다[2]. 따라서 배전계통에서는 이런 문제들을 없애기 위해서 전압에 대한 종합 고조파 왜율(Total Harmonic Distortion)을 5%이내로 유지하도록 하고 있다[2~4].

종합 고조파 왜율을 낮추기 위해서 고조파 발생원이 되고 있는 인버터 자체에서 고조파를 최대한

*정회원 : 대림전문대학 전기과, 교수
접수일자 : 1997. 5. 21

억제하는 것이 가장 효과적이다. 본 연구의 목적은 사전에 인버터의 스위칭 각을 계산하지 않고 프로그램 적으로 변조파와 반송파를 발생시켜, W형태 및 M형태의 펄스 폭 변조 신호에 의하여 운전되는 3상 5레벨 PWM인버터를 구현하고 출력전압의 중합 고조파 왜율을 비교 분석하는 것이다. 인버터를 응용한 전동기 가변속 구동장치에서는 저속운전에서 고속운전으로 빈번한 운전이 이루어지므로 인버터의 출력 전압 고조파 왜율을 낮출 수 있는 방안이 필요하다. 무정전 전원 공급 장치의 경우에는 일정 주파수 일정 전압을 유지하면서 출력전압의 고조파 왜율은 최소한 5[%] 이내로 유지하도록 하여야 한다. 그런데 IEC 77B(S) b1 문서에 의하면 전기기기의 중합 고조파 왜율은 8[%] 이하로 규정하고 있다[5].

본 연구에서는 W형태 및 M형태의 펄스 폭 변조파를 소프트웨어에 의하여 발생시켜 3상 5레벨 PWM 인버터를 구동하였을 때 출력 파형에 함유된 고조파 성분을 분석하였고, 인버터의 출력전압의 중합 고조파 왜율을 5[%] 이하로 대폭 낮출 수 있음을 입증하였다.

2. W형 및 M형 3상 5레벨 펄스 폭 변조

PWM 인버터의 제어를 위한 펄스 폭 변조 방법은 최근 디지털 방식이 주류를 이루고 있다. 일반적으로 채택되고 있는 방법은 사전에 특정 고조파를 제거할 수 있는 펄스 폭 변조 신호를 계산하여 룩업 테이블 형태로 메모리에 저장하고, 이 펄스 폭 변조 신호를 이용하여 인버터를 제어하는 것이다. 여기에서는 소프트웨어에 의하여 정현파인 변조파(modulation wave)와 삼각파인 반송파(carrier wave)를 발생시키고, 펄스 폭 변조 신호를 출력시키면서 그림 1과 같은 인버터를 제어한다. 그림 2의 (a)형태로 반송파와 변조파를 발생시킬 때, 3상 PWM 인버터의 상전압 파형은 그림 2의 (b) 및 (c)의 형태가 되고, 선간전압 파형은 그림 2의 (d)의 형태가 된다. 따라서 3상 5레벨 PWM 인버터의 상전압은 3레벨이 되지만 선간전압은 5레벨이 되고 있다.

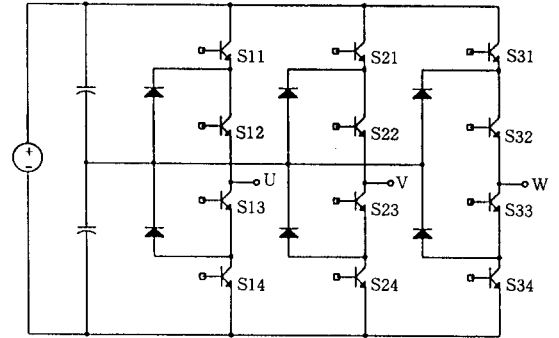


그림 1. 3상 5레벨 PWM 인버터의 주회로
Fig. 1. The main circuit of 3 phase 5 level PWM inverter.

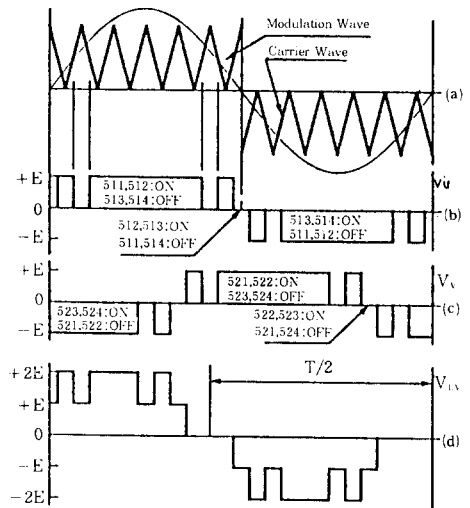


그림 2. 5레벨 PWM 인버터의 출력 형태
(a) 변조파와 반송파의 형태, (b) 및 (c) 상전압 형태
(d) 5레벨 출력 형태
Fig. 2. Output patterns of 5 level PWM inverter.
(a) patterns of carrier wave and modulation wave, (b) and (c) phase voltage patterns, (d) 5 level output pattern.

이때 반송파의 형태를 소프트웨어로 발생시켜 반송파와 변조파의 시작원점에서의 반송파의 형태가 W형인 그림 3의 (a)의 경우는 W형 펄스 폭 변조라 하고, 반송파의 형태가 M형인 그림 3의 (b)의 경우는 M형 펄스 폭 변조라 한다[6]. 여기서 변조파의 진폭과 반송파의 진폭의 비는 변조지수(modulation index)가 되고 반송파의 주파수와 변

고조파의 주파수의 비를 주파수비 (frequency ratio)라 한다.

본 연구에서 제안한 소프트웨어에 의한 3상 5레벨 PWM 인버터로 전동기 가변속 구동 시에는 PWM 인버터에서 변조지수를 출력 주파수에 따라 변화시켜 가변전압, 가변주파수 동작을 쉽게 할 수 있으며, 주파수비를 변화시키면서 출력 파형에 포함된 고조파 성분을 줄일 수 있게 된다. 따라서 W 형태의 펄스 폭 변조와 M 형태의 펄스 폭 변조시 변조지수와 주파수비를 다양하게 변화시킴에 따라 여러 가지 펄스 폭 변조 파형을 얻을 수 있고, 특정 고조파를 제거할 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 전동기 가변속 제어에 응용하는 경우 정 토오크 영역인 저속 운전영역에서는 변조지수와 주파수비를 제어하여 주기당 펄스 수를 많이 출력되도록 변조시키고, 정격속도이상의 높은 주파수 운전 시에는 주기당 펄스 수를 적게 출력되도록 하면, 종합 고조파 왜율을 5[%]이하로 억제하면서 효율적인 운전이 가능하게 된다.

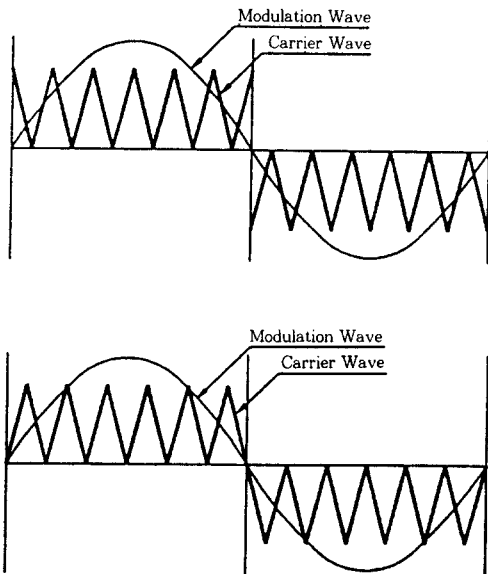


그림 3. W형 및 M형 PWM 구동신호 형태

(a) W형 PWM 구동신호, (b) M형 PWM 구동신호

Fig. 3. Driving signal patterns of W type and M type PWM. (a) W type PWM driving signal, (b) M type PWM driving signal.

3. 고조파 특성 해석

3상 5레벨 PWM 인버터의 출력 파형은 그림 4와 같이 되며 출력전압을 $V(t)$ 라 하면 $V(t)$ 는 주기 $2(\pi)$ 이고, 한 주기 내에 $n-1$ 번의 연속구간 및 n 번의 불연속구간을 갖는 주기함수가 되므로 식(1)과 같이 표현할 수 있다[1].

$$\begin{aligned}
 V(t) &= \frac{E}{jk\pi} (1 - e^{-jk\pi}) (-e^{-jk1} + e^{-jk2} - e^{-jk3} \\
 &\quad + e^{-jk4} - \dots - e^{-jk(m-1)} + e^{-jk m}) \\
 &= \frac{2E}{k\pi} (1 - e^{-jk\pi}) (\text{sinkt}_1 - \text{sinkt}_2 + \text{sinkt}_3 \\
 &\quad - \text{sinkt}_4 + \dots - \text{sinkt}_{m-1} + \text{sinkt}_m) \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서 $k=0, 1, 2, 3, \dots$

만약 k 가 우수이면, $1 - e^{-jk\pi} = 0$ 이므로 우수차 고조파 성분은 포함되지 않는다. 만약 k 가 기수이면, $1 - e^{-jk\pi} = 2$ 이므로 기수차 고조파 성분만 존재한다. 따라서 출력전압 $V(t)$ 는 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V(t) &= \frac{4E}{k\pi} (\text{sinkt}_1 - \text{sinkt}_2 + \text{sinkt}_3 - \text{sinkt}_4 \\
 &\quad \text{sinkt}_5 - \dots - \text{sinkt}_{m-1} + \text{sinkt}_m) \\
 &= \frac{4E}{k\pi} \left[\sum_{n=0}^m (-1)^{n+1} \text{sinkt}_n \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서 $k=2+1, u=0, 1, 2, 3, \dots, n=1, 2, 3, \dots, m$

식(2)에 의하면 3상 5레벨 PWM 인버터의 출력

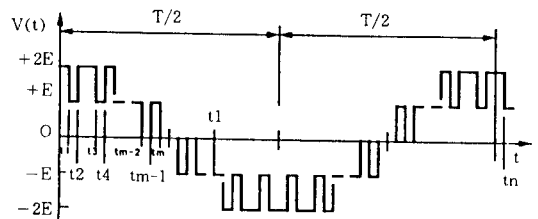


그림 4. 5레벨 PWM 인버터의 출력 파형 형태

Fig. 4. The output waveform pattern of 5 level PWM inverter.

전압 파형에는 고조파 성분이 존재하나 스위칭 각도 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_m$ 은 펄스 폭 변조파에 따라 달라지고 출력전압의 고조파 성분도 달라지게 된다. 3상 5레벨 PWM 인버터의 출력전압 $V(t)$ 에 포함되어 있는 고조파 성분을 V_k 라 하고 기본파 성분을 V_1 이라 하면, 종합 고조파 왜율(THD: Total Harmonic Distortion)은 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$THD = \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{k=3}^{\infty} V_k^2} \quad (3)$$

4. 소프트웨어 및 하드웨어 구성

종전의 디지털 방식에서는 특정 고조파를 제거할 수 있는 펄스 폭 변조 형태를 사전에 계산한 다음 여러 가지 형태의 데이터를 메모리에 록업 테이블 형태로 저장하여야 한다. 이러한 펄스 폭 변조 형태는 전동기의 속도제어에 응용하려면 수 많은 록업 테이블을 저장시켜야 하고 인버터의 출력 전압의 변화를 출력 주파수의 변화에 대응하여 선형적으로 제어하기가 어렵게 된다.

그러나 제안한 소프트웨어에 의한 펄스 폭 변조기법은 기본 데이터와 식(4)에 의하여 다양한 변조파를 만든다. 기본 데이터는 사전에 메모리의 일정영역에 저장하는 값으로 변조파형태에 따라 자유롭게 결정할 수 있다. 여기서 M이 변하면 변조지수도 변하게 되는데 V는 외부 하드웨어에 의하여 8비트로 입력되는 값으로 00H~0FFH의 범위로 입력되므로 변조지수는 0~2.0의 범위에서 변화시킬 수 있다. V를 변화시키면 변조지수를 변화시킬 수 있으므로 변조지수도 자유롭게 바꿀 수 있다.

$$M = \frac{255V \sin\theta}{127} \quad (4)$$

반송파는 삼각파의 형태로 W형 및 M형으로 메모리의 일정영역에 저장되어 있으며 식(4)에 의한 연산으로 변조파의 진폭을 계산한다. 연산한 변조파 진폭의 값들은 시간축에 대응하도록 사전에 구간이 분할된 영역에 저장되게 된다. 본 프로그램에서는 인버터의 출력 주파수의 반 주기를 일정한 구간으로

분할하여 저장하고 있다. 주파수 비의 변화는 다른 메모리 영역에 저장된 반송파를 이용한다. 인버터 출력 주파수의 반 주기에 대응하는 변조파와 반송파를 비교하여 펄스 폭 변조 신호가 3상 5레벨 PWM인버터를 제어한다. 인버터의 출력 주파수는 외부 하드웨어에서 발생하는 펄스를 이용하여 제어한다. 이와같은 소프트웨어에 의한 펄스 폭 변조 방식은 종전의 아날로그 방식과 같이 인버터의 출력전압의 변화를 출력 주파수의 변화에 대응하여 선형적으로 제어하기가 용이하다. 변조지수를 바꾸기 위한 제어신호가 디지털값으로 입력되면 새로운 변조파가 즉시 발생되며, 이 변조파와 반송파에 의하여 W형 또는 M형의 펄스 폭 변조 신호를 출력시켜 3상 5레벨 PWM 인버터를 제어하게 된다. 따라서 일정 V/F 제어 응용의 경우에 주파수비와 변조지수를 바꾸는 제어신호에 의하여 여러 가지 펄스 폭 변조 형태를 다양하게 출력하면서 종합 고조파 왜율을 낮출 수 있는 특징이 있다.

인버터 시스템의 하드웨어부분은 개인용 컴퓨터, 16비트급 마이크로 프로세서 키트, 주파수 및 변조지수 변경을 위한 외부 하드웨어, 인버터로 구성하였다. 그림 5는 마이크로 컴퓨터로 구동되는 인버터 실험장치를 보여주고 있다. 부하로는 공기조화용 팬을 구동하는 0.75[kW]급 3상 유도 전동기를 선택하였다. 공기조화용 팬의 전동기는 속도가 빈번하게 제어되므로 전동기의 가변속 운전영역에서 인버터에 의하여 종합 고조파 왜율을 제어할 수 있어야 한다.

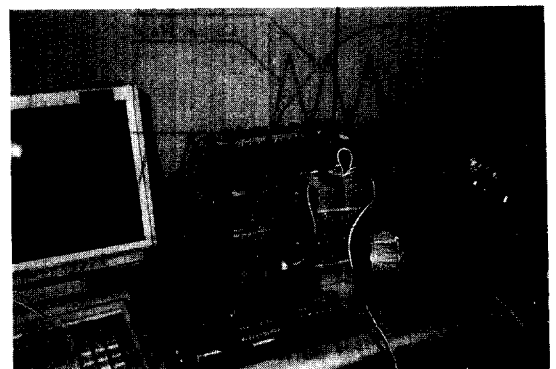


그림 5. 인버터 실험장치
Fig. 5. Experimental apparatus of inverter.

무정전 전원 장치용 인버터로 이용할 경우에는 정전압 정주파수로 운전하면서 종합 고조파 왜율을 5% 이하로 낮출 수 있어야 한다.

5. 고조파 분석 및 실험 결과

W형 및 M형의 펄스 폭 변조과의 주파수비를 6, 12, 18, 36 으로 바꾸면서 각 주파수비에 대응하여 변조지수도 0.1~2.0의 범위내로 변화시킬 때 종합 고조파 왜율을 분석하였다. 변조지수의 변화는 2.0 이상의 범위로도 조정 가능하나, 종합 고조파 왜율 및 전동기 가변속 구동 응용을 고려하여 최대 2.0까지 변화할 수 있도록 하였다. 그림 6, 그림 7, 그림 8, 그림 9는 W형태 및 M형태로 펄스 폭을 변조하면서 주파수비를 6, 12, 18, 36으로 변화 시켰을 때의 출력전압에 대한 종합 고조파 왜율을 측정된 결과이다. 이때 부하로는 3상 유도 전동기를 사용하였고 종합 고조파 왜율은 FLUKE사의 Power Harmonic Meter로 측정하였다. 고조파 측정결과를 분석하면 주파수비가 6, 12, 18인 경우에는 종합 고조파 왜율이 변조지수를 변화시켜도 5[%]이하로 낮추기는 어렵다. 그러나 주파수비를 36으로하고 M형태의 펄스 폭 변조신호 구동하였을 때, 변조지수 1.3~1.5인 경우 종합 고조파 왜율을 5[%]이하로 낮출 수

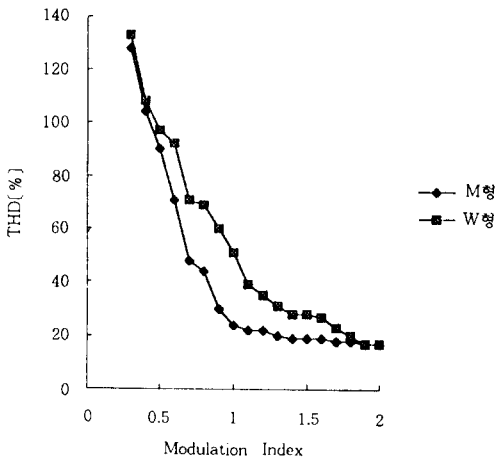


그림 6. 종합 고조파 왜율 (주파수비=6)
Fig. 6. Total harmonic distortion (frequency ratio=6)

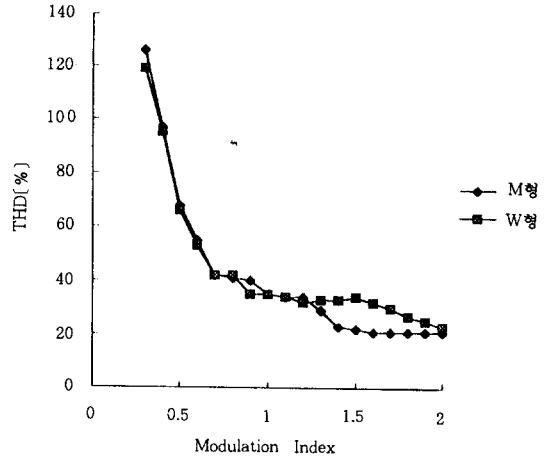


그림 7. 종합 고조파 왜율 (주파수비=12)
Fig. 7. Total harmonic distortion (frequency ratio=12)

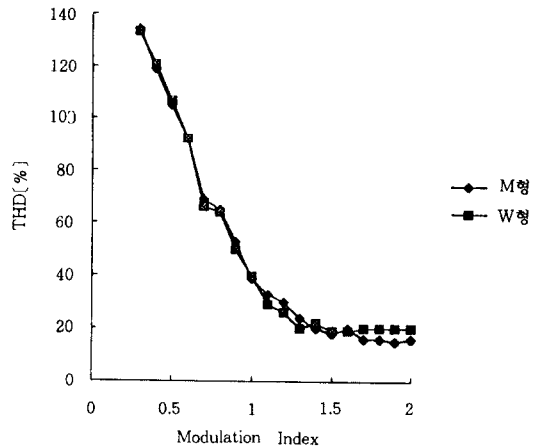


그림 8. 종합 고조파 왜율 (주파수비=18)
Fig. 7. Total harmonic distortion (frequency ratio=18).

있음을 입증하였다. W형태의 경우 주파수비를 36으로 하고 변조지수 0.8~1.9인 범위에서는 IEC의 추천기준인 종합 고조파 왜율 8[%]이하로 제어할 수 있음을 입증하였다[5]. 그림 10은 주파수비 36, 변조지수 1.4, M형 펄스 폭 변조 신호로 구동되는 3상 5레벨 PWM인버터의 출력파형의 고조파 스펙트럼과 출력파형을 동시에 측정된 것이다. 여기서 대부분의 저차 고조파 성분은 제거되고 있음을 알

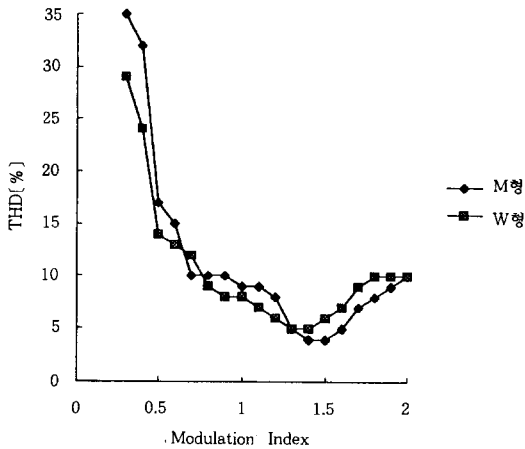


그림 9. 종합 고조파 왜율 (주파수비=36)
Fig. 9. Total harmonic distortion (frequency ratio=36)

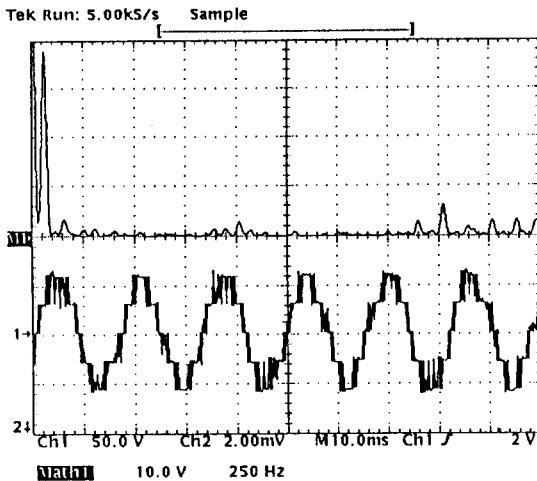


그림 10. 3상 5레벨 PWM 인버터의 고조파 스펙트럼과 출력 파형(주파수비=36, 변조지수=1.4, M형 PWM)
Fig. 10. The harmonic spectrum and output waveform of 3 phase 5 level PWM inverter.(frequency ratio=36, modulation index=1.4, M type PWM)

수 있다. 실험결과에 의하면 M형 PWM방식이 W형 PWM방식에 비하여 종합 고조파 왜율을 낮출 수 있는 것으로 평가된다.

인버터의 운전상태와 출력 파형을 관찰하기 위하여 정격 전압 220[V], 정격 출력 0.75[kW], 정격 전류 3.5[A]인 3상 유도전동기를 부하로 사용하였

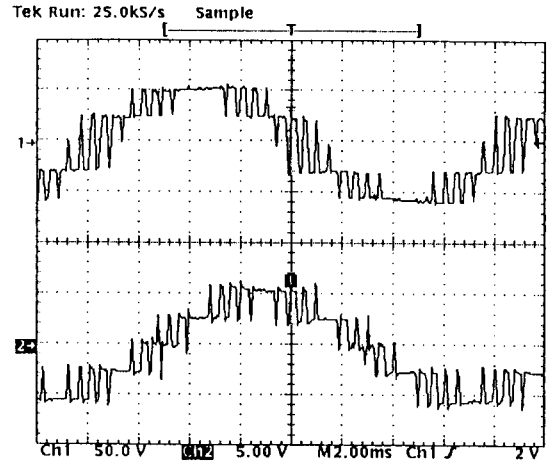


그림 11. 3상 출력 전압 파형
Fig. 11. The waveforms of 3 phase output voltage.

다. 인버터는 양호한 동작상태를 나타내었다. 그림 11은 M형 PWM, 변조지수 1.4, 주파수비 36, 인버터의 출력 주파수 60[Hz]인 경우의 3상 5레벨 PWM 인버터의 3상 출력 전압 파형을 측정된 결과이다.

6. 결론

본 연구에서는 소프트웨어에 의하여 W형태 및 M형태 펄스 폭 변조로 구동되는 3상 5레벨 PWM 인버터를 구현하여 인버터의 출력 파형에 포함되는 고조파 성분을 대폭 제거할 수 있는 방안을 제시하였다. 따라서 종전 아날로그 방식과 같이 제어가 가능하며 다양한 펄스 폭 변조 제어가 가능하기 때문에 종합 고조파 왜율을 5[%]이하로 낮출 수 있는 특징이 있다. 가변 전압, 가변 주파수 운전의 경우에 일정한 종합 고조파 왜율 이내에서 효율 좋은 운전이 가능하게 되며, 무정전 전원장치의 경우에도 종합 고조파 왜율을 5[%]이하로 개선하여 인버터 응용 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. W형 및 M형의 펄스 폭 변조 신호로 3상 5레벨 PWM 인버터를 구동하여, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 소프트웨어에 의하여 W형 및 M형 PWM방식

으로 제어되는 3상 5레벨 PWM 인버터를 구현함으로써 인버터의 종합 고조파 왜율을 5[%]이하로 낮출 수 있음을 입증하였다.

2) 제안한 M형 펄스 폭 변조, 주파수비 36, 변조지수 1.3~1.5인 경우에는 인버터의 종합 고조파 왜율을 4[%]까지 낮출 수 있어, 효율좋은 무정전 전원장치로 응용할 수 있다.

3) 전동기의 속도 제어에 응용하는 경우 M형 또는 W형 PWM으로 주파수비를 36으로하고 변조지수를 0.8~1.9의 범위로 3상 5레벨 PWM 인버터를 운전할 경우 IEC 기준인 종합 고조파 왜율 8[%]이하로 유지할 수 있다.

본 논문은 1995학년도 학교법인 대림학원 학술연구 조성에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Eon Bin Song et al., "Software Based Modulation Technique of 3 Phase 5 level Inverter to Reduce Total Harmonic Distortion", Proceedings of ISPE '95, pp.471-475, Oct.1995.

[2] David E.Rice, "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics-Their effect on Power Systems Components," IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. IA-22, No. 1, pp.161-177, Jan./Feb. 1986.

[3] 電氣設備學會, "ビル電氣設備の高調波に関する調査研究報告" 電氣設備學會誌, Vol. 16, No.7, 1996.

[4] 大西一彦, 上田武憲, "高調波とその対策: 受變電設備" 電設工業, Vol. 38, No.3, pp.6-13, 1992.

[5] 正田英介 外, "電氣設備と高調波" 電設工業, Vol.38, No. 3, pp.2-65, 1992.

[6] Jia You Lee and York Yih Sun, "Adaptive Harmonic Control in PWM Inverters with Flutuating Input Voltage", IEEE Trans. on Ind.Electronics, Vol.IE-33, No.1, pp.92-98, Feb. 1986.

[7] Mario Marchesoni, "High-Performance Current Control Techniques for Applications Multilevel High-Power Voltage Source Inverters" IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.7, No.1, pp.189-204, Jan.1992.

[8] S.R.Bowes and P.R.Clark, "Transputer based harmonie-elimination PWM Control of inverter drives," IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol.28, No.1 pp.81-88, Jan./Feb. 1992.

[9] Katsunori Taniguchi and Hisaichi Irie, "Trapzoidal Modulating Signal for Three-Phase PWM Inverter" IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol IE-33, pp.193-200, May 1986.

[10] P.P.Biringer and M.A.Slonim, "Determination of Harmonics of Converter Current and/or Voltage Waveform (new method for fourier coefficient calculations), Part I: Fourier Coefficients of Homogeneous Functions," IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. IA-16, NO.2, pp.242-247, March./April, 1980.

[11] Raymond S. Ramshaw et al., "A PWM Inverter Algorithm for Adjustable Speed AC Drives Using a Nonconstant Voltage Source" IEEE Trans on Ind. Appl., Vol.IA-22, No.4, July/Aug.1986.

◇ 著 者 紹 介 ◇



송 언 빈 (宋彦彬)

1953년 4월 23日生, 1977년釜山大工大電氣工學科 卒. 1984년釜山大大學院電氣工學科 卒(碩士). 1993년中央大大學院電氣工學科 卒(博士). 韓國建設技術研究院 研究室長, 現在 大林專門大 電氣科 教授, 當學會 編修理事.